

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОГО ИЗМЕНЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ПОТОКА ЭНЕРГИИ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ ПЕРЕДАЮЩИХ АНТЕНН

## THE RESEARCH OF SPATIO-TEMPORAL VARIATION OF THE ENERGY FLUX DENSITY IN THE NEAR ZONE OF TRANSMITTING ANTENNAS

**Аннотация.** В статье представлены результаты исследований пространственно-временного изменения плотности потока энергии в ближней зоне передающих антенн, включая вывод общих выражений для расчета и анализа усредненного значения плотности потока энергии, анализ пространственного распределения усредненного значения амплитуды вектора Пойнтинга на произвольном от антенны расстоянии, а также численное моделирование.

**Summary.** The results of the research of spatio-temporal variation of the energy flux density in the near zone of the transmitting antennas including the derivation of general expressions for the calculation and analysis of the averaged value of energy flux density are presented in the article. The analysis of spatial distribution of the averaged value of the Poynting vector magnitude at an arbitrary distance from the antenna and numerical modeling are carried out as well.

Современный этап развития телекоммуникаций характеризуется появлением на рынке все большего числа предложений по разработке, проектированию и внедрению новых цифровых систем передачи информации. Все это в равной степени относится, как к радиосвязи, так и радиовещанию и телевидению. Одним из существенных моментов при проектировании любых излучающих систем является анализ электромагнитной обстановки вблизи мест размещения передающих антенн, что неразрывно связано с проблемами их функционирования, как совместно друг с другом (электромагнитная совместимость), так и в непосредственной близости к биологическим объектам (электромагнитная экология). Задачи электромагнитного мониторинга, включая численное моделирование электромагнитной обстановки, ее инструментального контроля, в общем виде решены. Основные результаты, подтвержденные многочисленными экспериментальными исследованиями, нашли отражение в виде нормативно-методических документов, в частности, утвержденных государственными органами санитарно-эпидемиологического надзора [1, 2].

Основной задачей, вытекающей из указанных проблем, есть задача нахождения абсолютных значений плотности потока энергии, анализ ее пространственного распределения и временного изменения. В настоящее время наиболее полно решена задача вычисления вектора Пойнтинга (плотности потока энергии) в дальней зоне передающих антенн, что связано с локально плоским характером электромагнитной волны [3]. Именно на этом предположении сформулированы расчетные методики для определения уровней электромагнитного поля, а также границ санитарно-защитных зон и зон ограничения застройки в местах размещения передающих антенн [1, 2]. Однако в ближней зоне передающих антенн, в которой проблема электромагнитной экологии наиболее актуальна, эта задача является малоисследованной. Это связано с тем, что в ближней зоне передающих антенн, формируемая ими электромагнитная волна не может считаться плоской, и взаимосвязь между ее составляющими не столь очевидна. Некоторые результаты, близкие по тематике, представлены в работе [4], где основное внимание уделено временному изменению вектора Пойнтинга, физической интерпретации данных изменений.

Целью данной статьи является анализ пространственного распределения усредненного значения амплитуды вектора Пойнтинга на произвольном от антенны расстоянии.

Из теории электромагнитного поля известно [3], что плотность потока электромагнитной энергии (плотность мощности), характеризуемая вектором Пойнтинга  $\vec{P}$ , определяется на основе векторного произведения

$$\vec{P} = [\vec{E}, \vec{H}], \quad (1)$$

где  $\vec{E}, \vec{H}$  – векторы напряженности электрического и магнитного поля соответственно.

Для описания векторов  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  воспользуемся их разложением по ортам сферической системы координат  $\vec{r}, \vec{\theta}, \vec{\phi}$  (рис. 1).

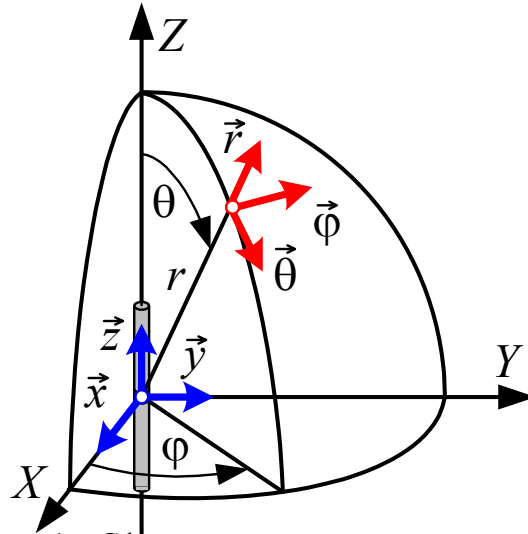


Рисунок 1 – Сферическая система координат

$$\left. \begin{aligned} \vec{E} &= E_r \vec{r} + E_\theta \vec{\theta} + E_\phi \vec{\phi}; \\ \vec{H} &= H_r \vec{r} + H_\theta \vec{\theta} + H_\phi \vec{\phi}. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

В частном случае, рассматривая поле излучения передающей антенны в дальней зоне, где продольные компоненты векторов  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  стремятся к нулю, т.е.  $E_r, H_r \rightarrow 0$ , (2) можно переписать в виде [5]

$$\left. \begin{aligned} \vec{E} &\approx E_\theta \vec{\theta} + E_\phi \vec{\phi}; \\ \vec{H} &\approx H_\theta \vec{\theta} + H_\phi \vec{\phi}. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

При этом, если учесть, что передающая антенна формирует в дальней зоне линейно-поляризованное поле и плоскость поляризации совпадает с плоскостью расположения векторов  $\vec{r}$  и  $\vec{\theta}$ , то (3) преобразуются к виду

$$\left. \begin{aligned} \vec{E} &\approx E_\theta \vec{\theta}; \\ \vec{H} &\approx H_\phi \vec{\phi}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Аналогичным образом можно разложить и вектор  $\vec{\Pi}$  по ортам сферической системы координат

$$\vec{\Pi} = \Pi_r \vec{r} + \Pi_\theta \vec{\theta} + \Pi_\phi \vec{\phi}. \quad (5)$$

Тогда, раскрывая векторное произведение (1), получаем

$$[\vec{E}, \vec{H}] = \vec{r} (E_\theta H_\phi - E_\phi H_\theta) + \vec{\theta} (E_\phi H_r - E_r H_\phi) + \vec{\phi} (E_r H_\theta - E_\theta H_r), \quad (6)$$

где

$$\Pi_r = E_\theta H_\phi - E_\phi H_\theta; \quad \Pi_\theta = E_\phi H_r - E_r H_\phi; \quad \Pi_\phi = E_r H_\theta - E_\theta H_r. \quad (7)$$

Анализ (7) при сопоставлении с (3) подтверждает известный вывод о том, что вектор Пойнтинга в дальней зоне имеет только продольную компоненту  $\Pi_r$ , остальные компоненты равны нулю [3]. Причем для линейно-поляризованного поля, описываемого (4), эта компонента равна

$$\Pi_r = E_\theta H_\phi. \quad (8)$$

Учтем на данном этапе монохроматический характер электромагнитного поля, изменяющегося во времени  $t$  с круговой частотой  $\omega$ . Тогда соответствующие компоненты векторов  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  можно записать в виде:

$$\left. \begin{aligned} E_r &= |E_r| \cos(\omega t + \psi_r^E); \\ E_\theta &= |E_\theta| \cos(\omega t + \psi_\theta^E); \\ E_\varphi &= |E_\varphi| \cos(\omega t + \psi_\varphi^E); \end{aligned} \right\} \left. \begin{aligned} H_r &= |H_r| \cos(\omega t + \psi_r^H); \\ H_\theta &= |H_\theta| \cos(\omega t + \psi_\theta^H); \\ H_\varphi &= |H_\varphi| \cos(\omega t + \psi_\varphi^H); \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

где  $|E|, |H|$  и  $\psi^E, \psi^H$  – амплитуды и начальные фазы соответствующих компонент векторов  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  электромагнитного поля.

Представление компонент векторов  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  в виде (9) позволяет перейти к непосредственному перемножению составляющих для получения соответствующих компонент вектора  $\vec{\Pi}$ . В частности, рассмотрим отдельно слагаемые компоненты  $\Pi_r$ ,

$$\begin{aligned} E_\theta H_\varphi &= |E_\theta| |H_\varphi| \cos(\omega t + \psi_\theta^E) \cos(\omega t + \psi_\varphi^H); \\ E_\varphi H_\theta &= |E_\varphi| |H_\theta| \cos(\omega t + \psi_\varphi^E) \cos(\omega t + \psi_\theta^H). \end{aligned}$$

Произведем замену переменных  $\alpha = \omega t + \psi_\theta^E$ ,  $\beta = \omega t + \psi_\varphi^H$ . Тогда

$$\cos(\omega t + \psi_\theta^E) \cos(\omega t + \psi_\varphi^H) = \cos \alpha \cos \beta.$$

Используя тригонометрическое тождество

$$\cos \alpha \cos \beta = 0,5 [\cos(\alpha - \beta) + \cos(\alpha + \beta)],$$

получаем

$$\cos(\omega t + \psi_\theta^E) \cos(\omega t + \psi_\varphi^H) = 0,5 [\cos(\psi_\theta^E - \psi_\varphi^H) + \cos(2\omega t + \psi_\theta^E + \psi_\varphi^H)].$$

Поступая аналогичным образом, также можно записать

$$\cos(\omega t + \psi_\varphi^E) \cos(\omega t + \psi_\theta^H) = 0,5 [\cos(\psi_\varphi^E - \psi_\theta^H) + \cos(2\omega t + \psi_\varphi^E + \psi_\theta^H)].$$

Далее, осуществив перегруппировку слагаемых и выделив независимые (средние), а также зависимые от  $\omega t$  (вариационные) слагаемые, получим

$$\Pi_r = \Pi_r^{\text{сп}} + \Pi_r(\omega t), \quad (10)$$

где

$$\begin{aligned} \Pi_r^{\text{сп}} &= 0,5 [|E_\theta| |H_\varphi| \cos(\psi_\theta^E - \psi_\varphi^H) - |E_\varphi| |H_\theta| \cos(\psi_\varphi^E - \psi_\theta^H)]; \\ \Pi_r(\omega t) &= 0,5 [|E_\theta| |H_\varphi| \cos(2\omega t + \psi_\theta^E + \psi_\varphi^H) - |E_\varphi| |H_\theta| \cos(2\omega t + \psi_\varphi^E + \psi_\theta^H)]. \end{aligned}$$

Аналогичным образом могут быть определены и другие компоненты вектора  $\vec{\Pi}$ , в частности

$$\Pi_\theta = \Pi_\theta^{\text{сп}} + \Pi_\theta(\omega t), \quad (11)$$

где

$$\begin{aligned} \Pi_\theta^{\text{сп}} &= 0,5 [|E_\varphi| |H_r| \cos(\psi_\varphi^E - \psi_r^H) - |E_r| |H_\varphi| \cos(\psi_r^E - \psi_\varphi^H)]; \\ \Pi_\theta(\omega t) &= 0,5 [|E_\varphi| |H_r| \cos(2\omega t + \psi_\varphi^E + \psi_r^H) - |E_r| |H_\varphi| \cos(2\omega t + \psi_r^E + \psi_\varphi^H)]; \\ \Pi_\varphi &= \Pi_\varphi^{\text{сп}} + \Pi_\varphi(\omega t), \end{aligned} \quad (12)$$

где

$$\begin{aligned} \Pi_\varphi^{\text{сп}} &= 0,5 [|E_r| |H_\theta| \cos(\psi_r^E - \psi_\theta^H) - |E_\theta| |H_r| \cos(\psi_\theta^E - \psi_r^H)]; \\ \Pi_\varphi(\omega t) &= 0,5 [|E_r| |H_\theta| \cos(2\omega t + \psi_r^E + \psi_\theta^H) - |E_\theta| |H_r| \cos(2\omega t + \psi_\theta^E + \psi_r^H)]. \end{aligned}$$

Анализ вариационных слагаемых  $\Pi(\omega t)$  в компонентах вектора Пойнтинга  $\vec{\Pi}$  показывает, что они изменяются с удвоенной частотой  $2\omega$  и в случае их временного усреднения даже в пределах полупериода электромагнитного колебания  $T/2 = 2\pi/2\omega$  все они тождественно равны нулю. Однако в общем случае, произвольное расстояние от передающей антенны, в частности в ее ближней зоне, их необходимо учитывать.

Так, амплитудное значение вектора Пойнтинга  $\vec{\Pi}$  с учетом его разложения (10) ... (12) по ортам сферической системы координат (5), равно

$$|\vec{\Pi}| = \sqrt{[\Pi_r^{\text{cp}} + \Pi_r(\omega t)]^2 + [\Pi_\theta^{\text{cp}} + \Pi_\theta(\omega t)]^2 + [\Pi_\phi^{\text{cp}} + \Pi_\phi(\omega t)]^2}, \quad (13)$$

а дальнейшее его временное усреднение в пределах периода  $T$  электромагнитного колебания приведет к выражению

$$|\vec{\Pi}|_{\text{cp}} = \int_0^T |\vec{\Pi}| dt. \quad (14)$$

Анализ (13) и (14) с учетом отмеченных выше замечаний, в частности, что в дальней зоне антенны отлична от нуля только лишь продольная компонента вектора  $\vec{\Pi}$  позволяет констатировать

$$|\vec{\Pi}|_{\text{cp}} = \int_0^T |\vec{\Pi}| dt = \int_0^T [\Pi_r^{\text{cp}} + \Pi_r(\omega t)] dt = \Pi_r^{\text{cp}}, \quad (15)$$

т.е. только в дальней зоне передающих антенн усредненное амплитудное значение вектора Пойнтинга равно среднему амплитудному значению продольной компоненты. Во всех других случаях, в частности в ближней и промежуточной зонах передающих антенн, расчет усредненного амплитудного значения вектора Пойнтинга необходимо производить в виде (13), т.е. с учетом вариационных слагаемых соответствующих компонент.

В качестве примера, иллюстрирующего пространственное распределение плотности мощности на произвольном расстоянии от передающей антенны, рассмотрим поле излучения элементарного электрического вибратора. Известно [5], что поле излучения такого вибратора, при расположении его вдоль оси  $Z$  (см. рис. 1), линейно-поляризовано и описывается следующими компонентами

$$\left. \begin{aligned} H_\phi &= \frac{jk^2 Il}{4\pi} \left[ \frac{1}{kr} - j \frac{1}{(kr)^2} \right] \cos \theta' \exp(-jkr); \\ E_\theta &= \frac{jk^2 I W}{4\pi} \left[ \frac{1}{kr} - j \frac{1}{(kr)^2} - \frac{1}{(kr)^3} \right] \cos \theta' \exp(-jkr); \\ E_r &= \frac{k^2 I W}{2\pi} \left[ \frac{1}{(kr)^2} - j \frac{1}{(kr)^3} \right] \sin \theta' \exp(-jkr), \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

где  $k = 2\pi/\lambda$  – волновое число свободного пространства;  $\lambda$  – длина волны электромагнитного колебания;  $W = 120\pi$  – волновое сопротивление свободного пространства;  $I$  и  $l$  – ток в точках возбуждения и действующая длина излучателя;  $r$  – расстояние от излучателя до точки наблюдения.

При переходе к дальней зоне антенны (16) преобразуются к виду

$$\left. \begin{aligned} H_\phi &= \frac{jkIl}{4\pi r} \cos \theta' \exp(-jkr); \\ E_\theta &= \frac{jkI W}{4\pi r} \cos \theta' \exp(-jkr); \\ E_r &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

В (16) и (17) угол  $\theta'$  отсчитывается от нормали к излучателю.

Отличие в расчетных выражениях (17) и обобщенной формулы, используемой для расчета уровней электромагнитного поля в методических указаниях [1,2] состоит в том, что множитель

$\frac{kI W}{4\pi r}$  (см. (17)) преобразован к виду  $\frac{\sqrt{30 P G \eta}}{r}$ , где  $P$  – мощность на входе антенно-фидерного тракта;  $G$  – коэффициент усиления антенны;  $\eta$  – коэффициент потерь антенно-фидерного тракта.

Используя результаты вышеприведенного анализа компонент вектора Пойнтинга (10) ... (12), а также его временное усреднение (14) с учетом (13) и (16), в том числе для дальней зоны антенны (15), проведено численное моделирование плотности потока энергии при произвольном расстоянии от антенны в различных направлениях.

Необходимо отметить, что при увеличении расстояния от передающей антенны, численные значения плотности потока энергии (усредненной во времени амплитуды вектора Пойнтинга),

полученные с использованием (14), приближаются к аналогичным значениям, полученным на основании (15). На рис. 2 изображены рассчитанные с использованием (14) – темная кривая и (15) – светлая кривая зависимости усредненной во времени амплитуды вектора Пойнтинга (плотности потока энергии). В частности, на рис. 2,а представлено изменение плотности потока энергии от относительного расстояния  $r/\lambda$  до точки наблюдения в направлении предполагаемого максимального излучения  $\theta = 0$  град. Здесь же пунктирной линией показана граница ближней зоны данного излучателя  $r = \lambda/2\pi$ . На рис. 2,б изображено пространственное распределение плотности потока энергии на границе ближней зоны данного излучателя  $r = \lambda/2\pi$ .

Согласно представленным рисункам, а также проведенным обобщением результатов численного моделирования можно констатировать следующее:

– для данного типа излучателя совпадение уровней плотности потока энергии в направлении  $\theta' = 0$  град., рассчитанные по упрощенной методике (предположение дальней зоны антенны) и более строгой (с учетом вариационных слагаемых в компонентах вектора Пойнтинга), наступает на границе ближней зоны  $r = (2\pi)^{-1}$  (см. рис. 2,а);

– соответствующие зависимости, характеризующие пространственное распределение плотности потока энергии на границе ближней зоны отличаются существенно (см. рис. 2,б). Совпадение этих зависимостей наступает при расстояниях в пять и более раз, превышающих границу ближней зоны;

– основные количественные результаты согласно рис. 2,б следующие: ширина характеристики направленности по уровню половинной мощности по упрощенной методике  $\approx 89$  град., в то время как для более строгой  $\approx 158$  град. При этом наблюдается превышение уровня максимального уровня, рассчитанного по упрощенной методике, на 1,8 дБ в направлениях  $\approx 55$  град. и  $\approx 125$  град.

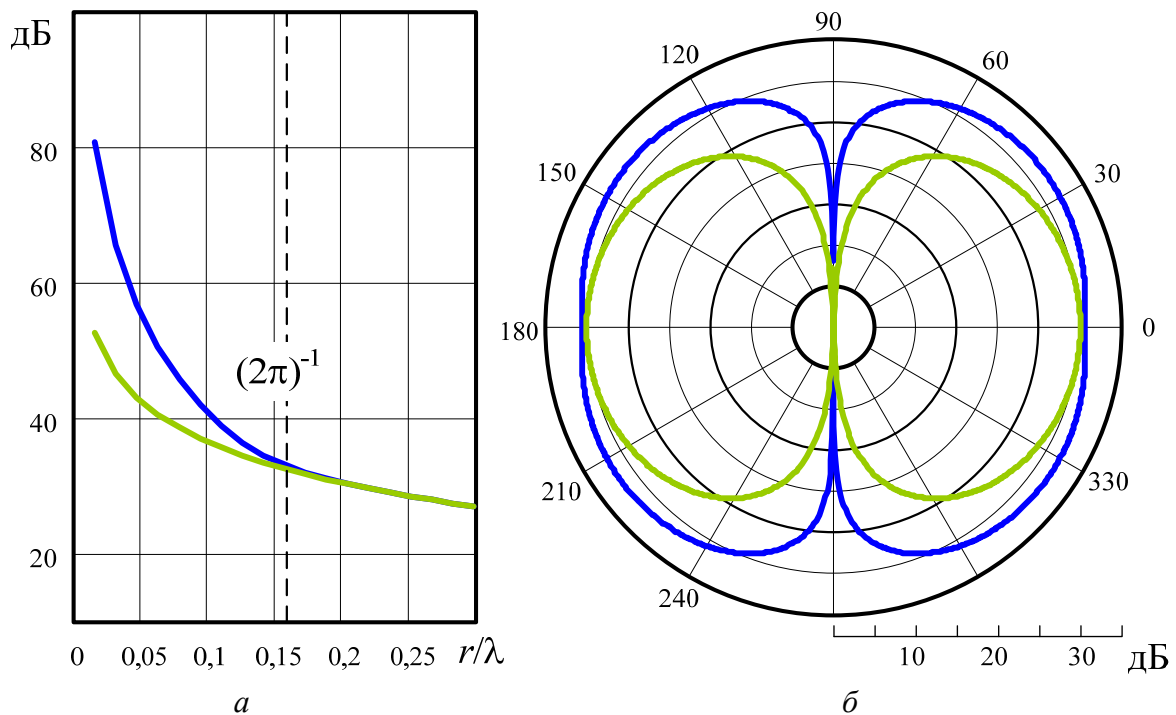


Рисунок 2 – Зависимости амплитуды вектора Пойнтинга

Все это свидетельствует о том, что даже в случае хорошо изученного элементарного электрического излучателя [5] при использовании его в качестве передающей антенны размеры и конфигурация санитарно-защитных зон вблизи него должны быть скорректированы.

Таким образом, в результате проведенных исследований:

– получены выражения для определения компонент вектора Пойнтинга в сферической системе координат, общее выражение для усредненного во времени амплитудного значения вектора Пойнтинга на произвольном расстоянии от передающей антенны;

– показано, что в отличие от дальней зоны в ближней зоне передающей антенны необходимо учитывать вариационные составляющие компонент вектора Пойнтинга, так как именно они в конечном итоге существенно изменяют пространственное распределение плотности потока энергии;

– проведен расчет и анализ пространственного распределения плотности потока энергии, создаваемой элементарным электрическим вибратором с использованием как упрощенной методики (предположение дальней зоны), так и более строгой. Приведены количественные и качественные оценки полученных результатов.

Для дальнейших исследований по данной тематике нужно выделить следующие направления:

– расчет и анализ пространственного распределения плотности потока энергии, формируемого используемыми на практике антеннами средней и высокой направленности; вычисление размеров и конфигурации санитарно-защитных зон для этих антенн;

– переход от монохроматического описания электромагнитных полей к электромагнитным полям с реальной спектральной картиной; пространственно-временной анализ плотности потока энергии для таких полей;

– разработка экспериментальных методик и измерительных средств для анализа пространственно-временного изменения плотности потока энергии вблизи передающих антенн.

### **Литература**

1. *Методичні вказівки щодо визначення рівнів електромагнітного поля засобів управління повітряним рухом цивільної авіації ВЧ, ДВЧ, УВЧ та НВЧ діапазонів: № 4550-88.* – М.: МОЗ СРСР, 1988. – 43 с.
2. *Методичні вказівки щодо визначення рівнів електромагнітного поля і меж санітарно-захисної зони і зони обмеження забудови в місцях розміщення засобів телебачення та ЧМ-радіомовлення: № 3860-85.* – М.: МОЗ СРСР, 1985. – 36 с.
3. *Гольдштейн Л.Д.* Электромагнитные поля и волны / Л.Д. Гольдштейн, П.В. Зернов – М.: Сов. радио, 1971. – 664 с.
4. *Гайнутдинов Т.А.* Расчет усредненного значения плотности потока энергии в ближней зоне антенн / [Т.А. Гайнутдинов, Г.А. Ерохин, В.Г. Кочержевский, А.А. Петровский] // *Электросвязь.* – 2000. – № 12. – С.39 – 40.
5. *Ільницький Л.Я.* Антени та пристрої надвисоких частот: підручник для ВНЗ / Ільницький Л.Я., Савченко О.Я., Сібрук Л.В.; за ред. Л.Я. Ільницького. – К.: Укртелеком, 2004. – 496 с.